

长输管道摩阻系数计算问题探讨

熊淑婉

(管道局职工学院)

在长输管道输送原油的水力摩阻计算方面, 国外文献中推荐的计算水力摩阻系数 λ 值的公式各不相同, 国内也有许多专家、学者在这方面进行了大量的研究。但在试验基础上所获得的半理论半经验公式或经验公式, 只适用于特定的管路工作条件。由于这个原因, 确定 λ 值的公式有100多个, 这就为我们选用较合适的计算公式造成了很大困难。为了探讨这方面的问题, 我们用镀锌钢管和铜管以及由塑料管和铜管组成的阻力实验装置台上, 进行了层流区、临界区以及用不同材料、不同直径的管子紊流区摩阻系数值的测定。所有的实验都是以水为介质, 水塔的水头为9m, 可保证雷诺数的范围 $Re < 1.6 \times 10^5$ 。测试后系统地整理了数据, 以便与国外有关文献资料进行对比, 探讨一些问题。

由于管道摩阻问题非常复杂, 通过小型实验装置难以精确地取得成果, 今后应创造条件扩大实验水头高度、流量范围、管径尺寸、管材类型以及原型实测石油管道的沿程摩阻系数值。

一、临界区摩阻系数的计算

流态由层流转变为紊流是一种突变。在该区域内, 目前还没有成熟的计算 λ 值的公式, 都是按紊流水力光滑区计算。现通过实验结果与国外有关资料进行对比分析。

用内径6mm、长1.8m的铜管进行水力摩阻实验, 其结果见图1。层流区的数据各点在 $\lambda = 64/Re$ 线上, 紊流区数据在Blasius公式(1)线上,

$$\lambda = 0.3164Re^{-0.25} \quad (1)$$

因实验材质为铜管, 这是符合规律的。而在介于层流与紊流之间的临界区(大约 $Re = 2000 \sim 4000$)却是一条曲线。

临界区的摩阻系数值, 若用水力光滑区的公式计算, 则认为 λ 值只与雷诺数有关, 而与管壁的粗糙度无关, 这与实际情况不符。从水力工作者在工业管道中进行的大量试验得知, 在临界区不同粗糙度的管子阻力系数是不同的, 而阻力系数取决于雷诺数和相对粗糙度的数值, 见图2(引自〔苏〕И.Е.伊杰奇克著《水力摩阻手册》)。

从图2看出, 由临界雷诺数 Re_1 到 Re_2 改变运动状态的区域里, 每个 Δ 值($\Delta = \Delta/D$)对应一条曲线, 每条曲线都具有自己的 Re_1 和 Re_2 值。对具有 $\Delta < 0.007$ 的工业管道, 根据САМОЙЛЕНКО建议:

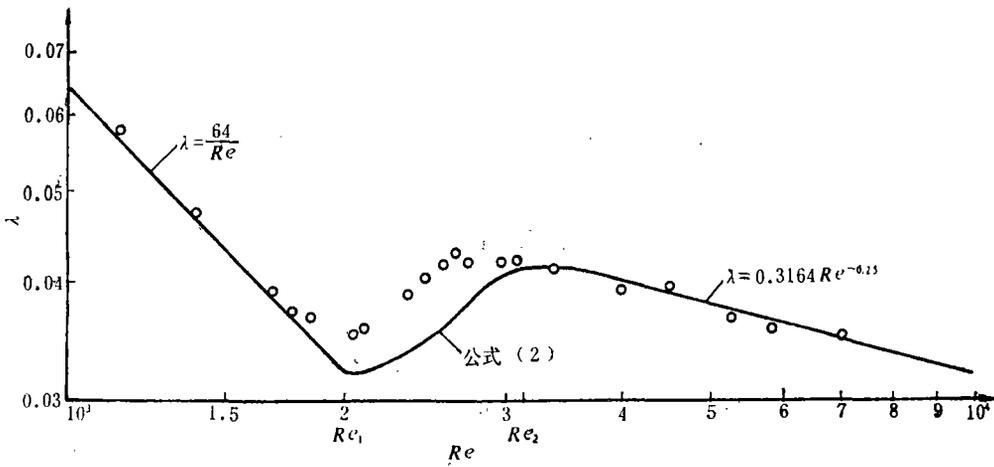


图 1 铜管的λ值与Re值之间的关系曲线

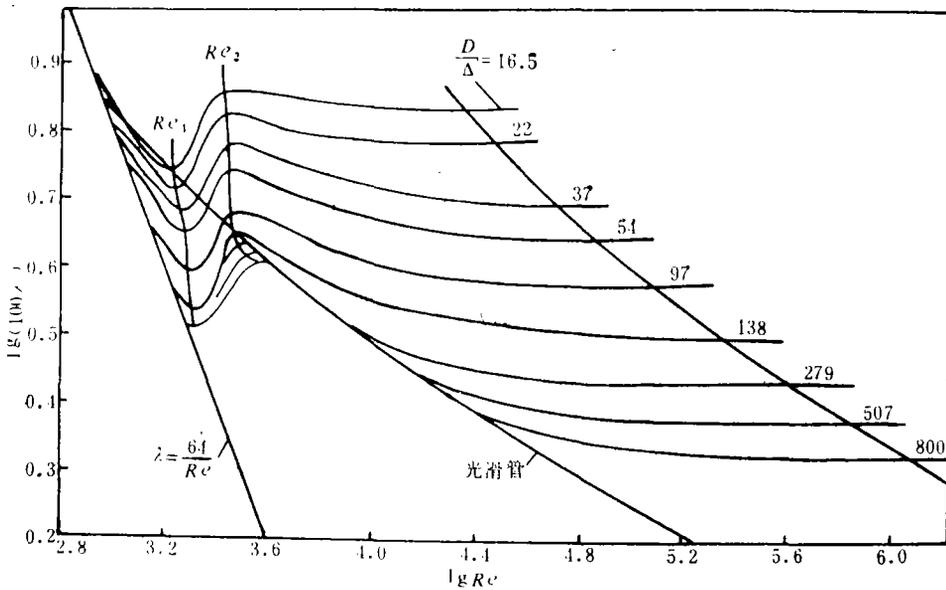


图 2 λ值与Re和D/Δ值之间的关系曲线(工业管道)

$$Re_1 = 1160 \left(\frac{1}{\Delta} \right)^{0.11}$$

即随着Δ值的增加, Re₁值是减少。

对具有任意粗糙度的管道, 其临界雷诺数Re₂为:

$$Re_2 = 2090 \left(\frac{1}{\Delta} \right)^{0.0135}$$

关于临界区 λ 值的计算,可按图2中曲线 $\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$ 查找或按САМОЙЛЕНКО的公式求出:当 $Re_1 < Re < Re_2$ 时

$$\lambda = (\lambda_2 - \lambda^*) \exp \{ - [0.0017 (Re_2 - Re)]^2 \} + \lambda^* \quad (2)$$

当 $\bar{\Delta} \leq 0.007$ 时

$$\lambda^* = \lambda_1 = 0.032$$

$$\lambda_2 = 7.244 (Re_2)^{-0.643}$$

系数 λ_1 和 λ_2 所对应的临界雷诺数为 Re_1 和 Re_2 。

当 $\bar{\Delta} > 0.007$ 时

$$\lambda^* = \lambda_1 - 0.0017 = 0.0758 - \frac{0.0109}{\bar{\Delta}^{0.286}}$$

$$\lambda_2 = 0.145 \bar{\Delta}^{0.244}$$

式中 $Re = vD/\nu$

若铜管的当量粗糙度 $\bar{\Delta}$ 值取0.01mm,通过计算得到临界雷诺数 $Re_2 = 3138$,它所对应的 $\lambda_2 = 0.041$ 。现将 $2000 < Re < 3138$ 范围内,用式(2)计算的 λ 值与实测的 λ 值列于下表。

公式(2)与实测值的比较表

测点	Re	λ 计算值	λ 实测值	测点	Re	λ 计算值	λ 实测值
1	2 051	0.0323	0.0360	6	2 650	0.0365	0.0428
2	2 108	0.0324	0.0364	7	2 770	0.0381	0.0420
3	2 330	0.0334	0.0393	8	2 948	0.0401	0.0423
4	2 476	0.0345	0.0404	9	3 041	0.0408	0.0424
5	2 617	0.0361	0.0415	10	3 142	0.0410	0.0423

从表中看出,在 $Re_1 < Re < Re_2$ 的临界区内,用式(2)计算的 λ 值是随着 Re 值的增加而增加的,这与实测值的情况相符(见图1)。而用式(1)计算的 λ 值却是随着 Re 值的增加而减少的,这与实测值的结果不符,并使得在临界雷诺数 $Re_1 = 2 000$ 附近,计算的 λ 值与实测的 λ 值相比,其误差高达30%。故临界区用САМОЙЛЕНКО公式比用式(1)计算 λ 值较接近液体流动的实际情况。

至于输油管道,由于临界区内流动状态很不稳定,通常应尽量避免在该区域内工作。

二、水力光滑区摩阻系数的计算

我国目前的长输管道大都是加热输送含蜡原油,这种原油粘度较高,一般认为流态是紊流水力光滑区,其雷诺数 $Re < 10^5$,所以在长输管道的设计计算中,大都采用达西公式与布拉修斯公式的演算式即列宾宗公式来计算摩阻。至于 λ 值的计算,各国所采用的公式不尽相同,工程实践中常采用一些适合本国情况的公式。

为了探讨这方面的问题,用镀锌钢管分别做了3种不同管径的对比实验($D_1 = 41.23$ mm, $D_2 = 26.81$ mm, $D_3 = 15.7$ mm)。现将实测结果与国内外较有代表性的公式(1)与式(3)的计算值在同一个 $\lambda-Re$ 关系图上进行比较,见图3。公式(1) ($4 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^5$)为苏联及我国计算水力光滑区摩阻系数值广泛选用的公式。而 Miller公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \lg Re - 1.53 \quad (3)$$

$$(3 \times 10^3 < Re < 3 \times 10^6)$$

近年来也被一些国家广泛采用。

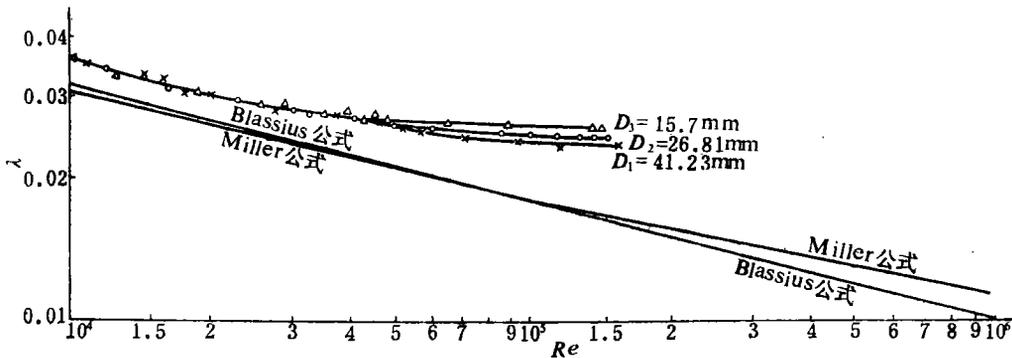


图3 镀锌钢管实验曲线与计算曲线的比较

从图3看出,实测曲线都在公式计算曲线的上方,这说明实测值与公式计算值有些差距。分析其主要原因是:①公式中未计入由于局部装置所引起的局部阻力;②测量管段的入口段较短。据戈威尔推荐,在管道中流动的牛顿液体,若 $Re > 2100$,则入口段长度可用式 $L_{入口}/D \geq 50$ 计算。本实验装置的入口段管内径为41.23mm,入口段长度不到1m,而计算所需长度为2.06m。这两点是造成摩阻系数的实测值大于计算值的主要原因,当然还有其它影响因素。

国外有这方面的资料,菲尔毕特泰尔在内径300mm的管道中用水作了两次实验,得到两条实验曲线,见图4中的2、3曲线(引自电力部电力建设研究所编:《远距离水力管道输送译文集》)。

按菲尔毕特泰尔提供当粗糙度 $\Delta = 0.1$ mm时,用经验公式判断流区为紊流混合摩擦区,所以图4中曲线2和3较接近用Colebrook—White公式的计算曲线1。在内径为315mm的料管中用水作实验得实验曲线4,据经验公式判断流区为紊流水力光滑区,所以实验曲线4较接近用式(1)计算的光滑管曲线5,但仍在曲线5的上方,即实测值大于计算值,这个规律与笔者实验的结果相同。

对于管内径十分光滑的塑料管和铜管,在实验室条件下,实测曲线相当接近光滑管的计算曲线,用细铜管(见图1)和塑料管(见图5)做的实验证明了这一点。

从理论上讲,两种管材相同(即内壁光洁度差不多),而直径不同的管子相比,管径变小的管子则相对粗糙度变大,摩阻系数值应升高,有可能 λ 值会比光滑管高,实

实际上从图 5 中看到 $D = 24\text{mm}$ 的管子也接近光滑管, 即图中实践。可见, 当塑料管的内壁相当光滑时, 即使内径变小, 相对粗糙度并不增加很多。

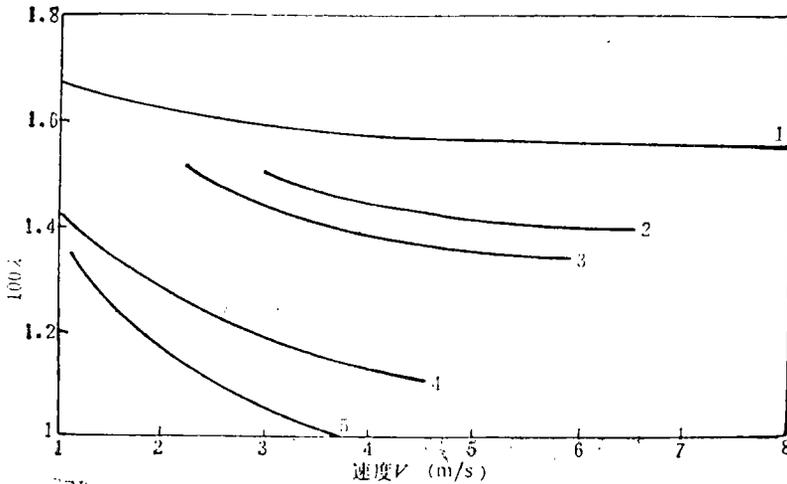


图 4 300mm管的实验曲线与计算曲线的比较

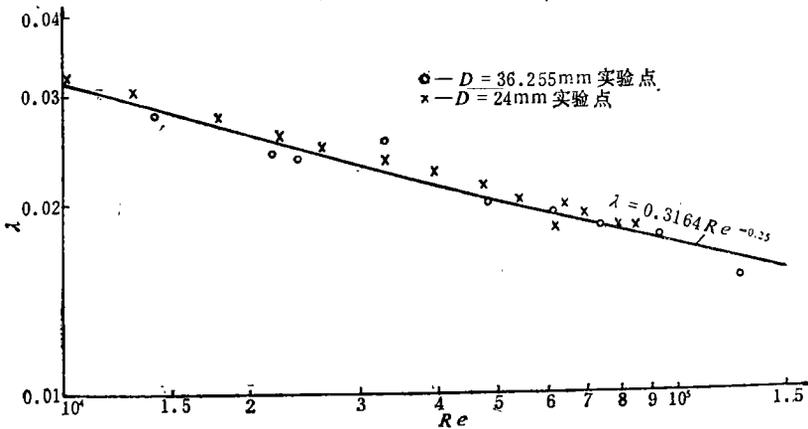


图 5 塑料管的 λ 值与 Re 值之间的关系曲线

以上是实验室的情况, 在实际管道上, 由于管子接头、管件等局部阻力的影响使管道阻力增大, 因此, 实测曲线也在理论计算曲线的上方。苏联萨维里也夫于1983年在古比雪夫—勃良斯克成品油管线上进行的测试表明: 实测数据与公式(1)的计算值在工作区内差别为16%, 大于计算值。

总之, 实际管道上造成的摩阻要比理论计算值大。根据苏联萨波日里柯夫和斯莫罗基洛夫的研究, 现有各种公式的计算值要比实测值低12%~25%, 这一论点也被其他一些学者所证实。因此, 在工程设计中必须考虑这一点而采取相应的措施。国内在考虑沿程水头损失所增加的局部阻力情况时, 是以增加管段全长的1%~2%摩阻数值来弥补

这个偏差的。

三、混合摩擦区摩阻系数的计算

随着国内新油田的开发,低粘原油也会相继找到,大口径管道又是今后发展的方向,这种管流中原油的流态通常可能属于混合摩擦区。计算该区摩阻系数值最准确的是科列勃鲁克—怀特公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.1 \lg \left(\frac{\Delta}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (4)$$

因该式为隐式计算不方便,现就苏联学者推荐的几个显式比较如下:

伊萨也夫公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.81 \lg \left[\frac{6.8}{Re} + \left(\frac{\Delta}{3.7D} \right)^{1.11} \right] \quad (5)$$

阿里特苏里公式:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (6)$$

弗兰克林公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.1 \lg \left[\frac{\Delta}{3.7D} + \left(\frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right] \quad (7)$$

切尔尼庚公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.83 \lg \left[\left(\frac{\varepsilon}{7.4} \right)^{1.083} + \frac{8.5}{Re} \right] \quad (8)$$

式中 ε ——相对粗糙度, $\varepsilon = 2\Delta/D$;

Δ ——当量粗糙度(简称粗糙度)。

其中公式(6)为〔苏〕学者荐牛顿原油在该区计算 λ 值的首选公式,公式(4)和(8)为该区的计算 λ 值的主要公式。

国内一些专家、学者在取相同的 Δ/D 情况下,计算公式(4)~(8)的 $Re = 10^n$ ($n = 4 \sim 7$)相对应的 λ 值,得知各式的值都是相当近似的。〔苏〕B.H.捷格亚也夫在所著《大口径输油管道水力计算经典公式的适用性》一文中指出,公式的计算值与试验值相比其误差为:式(4)是8%;式(5)和(7)是2%~3%。还指出,在大口径管道中,低粘原油的流态通常可能属于混合摩擦区。对于直径1200mm的管道,该区的雷诺数限于 $Re I = 0.55 \times 10^6$ 和 $Re II = 10^7$,而实际的雷诺数,例如对于里日列沃罗夫克—库依别舍夫管道则为 0.8×10^6 。

至于式(4)~(8)中当前主要应偏重于使用其中哪一个?他采用了下述方法研究。对于直径500~1200mm的输油管道,应求出该油流的混合摩擦区,即算出 $Re I = 56.5/\varepsilon^{8/7}$ 和 $Re II = (665 - 765 \lg \varepsilon)/\varepsilon$,并按式(4)~(8)计算出它们的 λ 值,然后计算其平均的 λ_{cp} 值,得公式的误差 = $[(\lambda - \lambda_{cp})/\lambda_{cp}] \times 100\%$ 。把计算结果绘在图6上。哪个公式的误差最小,则作为最准确的公式。从图6中看出,按式(4)、(7)

(8) 计算出的 λ 值与平均值 λ_{cp} 相差最小。在图 7 中给出了雷诺数从 $Re I$ 到 $Re II$ 范围内,不同直径管子所用公式的平均误差,误差最小的是式(4)、(7)和(8)。从图 6、7 中还可看出,按式(4)和(7)计算的结果实际上是相同的,但偏重于使用式(7)因为它是个显式,计算较方便。

结论是:推荐用式(7)和式(8)计算大口径输油管道混合摩擦区内的 λ 值。

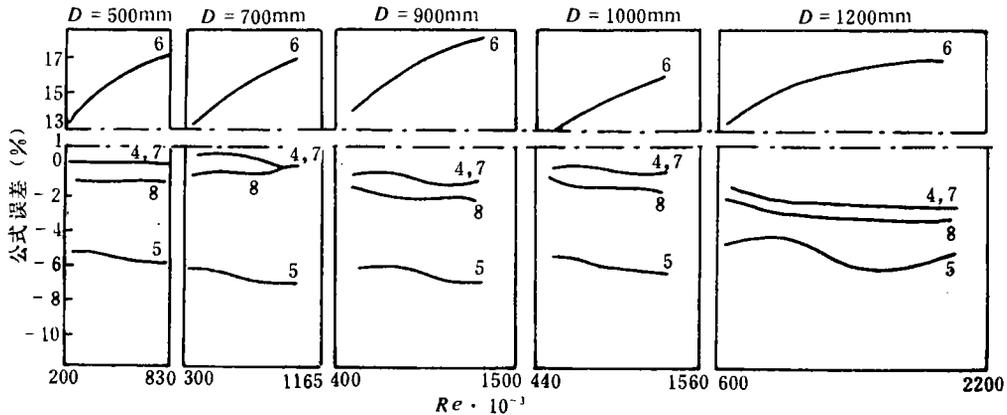


图 6 对于 $Re I$ 到 $Re II$ 范围内不同直径的管子相对于 λ_{cp} 公式的误差

四、结论

1. 在层流与紊流之间的临界区,用САМОЙЛЕНКО公式比用式(1)计算摩阻系数值较接近液体流动的实际情况。

2. 在水力光滑区,按公式计算的摩阻系数值,一般都小于输油管道上的实际摩阻系数值。对于管子内径十分光滑的铜管、塑料管,在实验室条件下,实测曲线相当接近光滑管的计算曲线。

3. 推荐用弗兰克林公式〔公式(7)〕和切尔尼庚公式〔公式(8)〕计算大口径输油管道混合摩擦区内的摩阻系数值。

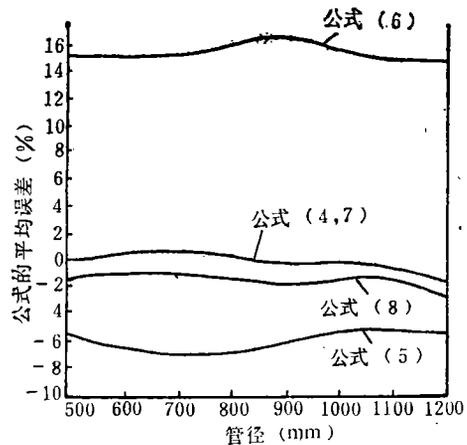


图 7 对于不同直径管子公式的平均误差

(本文曾得到罗塘湖、肖冶两位高级工程师的指导,在此表示感谢。)

(参考文献从略)

(收稿日期:1989年9月27日)